

## Sarera Konektatutako Bihurgailuen Erantzuna Hutsune Bifasikoen Aurrean

*(Response of Grid-Connected Converters to Two-Phase Voltage Sags)*

Alexander Gomez-Raya<sup>\*1,2</sup>, Alain Sanchez-Ruiz<sup>1</sup>, Amaia Lopez-de-Heredia<sup>2</sup>,  
Endika Bilbao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknologia Elektronikoa Saila, Vitoria-Gasteizko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Vitoria-Gasteiz

<sup>2</sup>Biltegiatzea eta Potentzia Elektronika, IKERLAN Zentro Teknologikoa, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Arrasate/Mondragón

### LABURPENA:

Energia berriztagarrien integrazioa funtsezkoa da helburu klimatikoak betetzeko, baina hauek sorgailu sinkrono konbentzionalak ordezkatzeko dituzten heinean, sistemaren inertzia eta indarra murriztu egiten dira, egonkortasun arazoak sorraraziz. Hori dela eta, sarearen konexio kodeek energia berriztagarrien bihurgailuek babes funtzioak betetzea eskatzen dute. Lan honek bihurgailuen kontrolak aztertzen ditu, batez ere tentsio baxuetan jarraitzeko gaitasunaren beharrak asetzeko. Sare desorekatuetan funtzionatzeko kontrolen gaitasunak eta mugak aztertu dira, eta emaitzak Matlab-Simulink bidez simulatu dira. Bihurgailuen kontrol klasikoak hutsune bifasikoen aurrean funtzionatzeko gai direla ondorioztatu da, baina sare desorekatuetan kontrol bereziak inplementatzea beharrezkoa da sare kodeen funtzionalitateak betetzeko.


HITZ GAKOAK: Bihurgailu kontrola, Kontrol bektoriala, LVRT, Sarera konektatutako bihurgailuen kontrola, Sare desorekatua, Sare jarraitzaile bihurgailuak, Tentsio hutsuneak

### ABSTRACT:

*The integration of renewable energies is essential to meeting climate goals, but as these replace conventional synchronous generators, the inertia and strength of the system decreases, causing stability problems. That is why grid connection codes require renewable energy converters to perform protective functions. This work examines the controls of power converters, specifically to meet the needs of low voltage ride through. The capabilities and limitations of controls under unbalanced grid conditions will be analysed and the results simulated through Matlab-Simulink. It has been concluded that classical converter controls are capable of operating under two-phase sags, but the implementation of advanced controls for unbalanced grids are necessary to comply with grid code functionalities.*

KEYWORDS: Converter control, Vector control, LVRT, Grid connected converter control, Unbalanced grid, Grid following converters, Voltage sags.

\***Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Alexander Gomez-Raya, José María Arizmendiarieta Pasealekua 2, Arrasate-Mondragón, 20500, Espainia.

 <https://orcid.org/0009-0000-1324-7924>, alexander.gomez@ikerlan.es

**Nola aipatu/How to cite:** Gomez-Raya, Alexander; Sanchez-Ruiz, Alain; Lopez-de-Heredia, Amaia; Bilbao, Endika (2025). «Sarera Konektatutako Bihurgailuen Erantzuna Hutsune Bifasikoen Aurrean», Ekaia, DOI: <https://doi.org/10.1387/ekaia.27526>

Jasoa: maiatzak 7, 2025; Onartua: uztailak 18, 2025  
ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / ©2025 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentzian dago

## 1. Sarrera

Helburu klimatikoak lortzeko energia berriztagarrien hazkundera ezinbestekoa da. Energia berriztagarri mota batzuk sarera konektatzeko potentzia-elektronikako bihurtgailuak erabiltzen dira, esate baterako, energia eolikoa eta eguzki-energia fotovoltaikoa. Gailu hauek ezinbestekoak dira energia berriztagarrien integrazioarako, teknologia bakoitzaren eta sarearen arteko tentsio egokitzapena burutzen dutelako [1].

Bihurtgailu hauen kopurua sistema elektrikoan handitzen doan heinean sorgailu sinkrono konbentzionalak ordezkatzen dira, sistemaren inertzia eta indarra murriztuz. Hori dela eta, sare konexioko kodeek energia berriztagarriak sarera konektatzen dituzten bihurtgailuek babes funtzio ezberdinak betetzea eskatzen dute. Hauetako bat tentsio baxuetan konektatuta jarraitzeko ahalmena (LVRT, ingelesez Low Voltage Ride Through) da, eta sarera konektatutako bihurtgailuak falten aurrean denbora zehatz bat konektatuta mantendu behar direla agintzen du [2, 3].

Sarera konektatutako bihurtgailuak kontrol egitura ezberdinekin kontrolatu daitezke. Sarearekin trukaturako potentziaren erregulazioa bihurtgailuaren irteera korrontearen kontrolaren bitartez burutzen da. Literaturan hainbat korronte kontrol egitura aurkitu daitezke: metodo erabilienak metodo linealak dira, hala nola Proporzional-Integral (PI) eta Proporzional-Erresonante (PR) kontrolagailuak, edo metodo ez-linealen bitartez, histeresi edo kontroladore prediktiboak erabiliz [4].

Kontrol metodo tradizionalak sare orekatuetan lan egiteko diseinatuta daude, baina sare desorekatuen aurrean, falta egoeran edo karga desorekatuen aurrean adibidez, portaera desegokia aurkeztu dezakete. Esaterako, potentzia oszilazioak, Korronte Zuzeneko (KZ) busaren tentsio oszilazioak edo korrontearen uhin-formaren distortsioa [5, 6].

Sare-egoera desorekatuei aurre egiteko, kontrol estrategia desberdinak aurkitu daitezke literaturan. Orokorrean estrategia hauek korrontearen sekuentzia positibo eta negatiboaren osagaiak erregulatzen dituzte konexio puntuari tentsio babesa emateko eta trukaturako potentziaren ezaugarriak eraldatzeko [7, 8].

Lan honen helburu nagusia sarera konektatutako bihurtgailuen kontrol metodo tradizionalak sare desorekatuen aurrean LVRT funtzioak betetzeko mugak, eta beharrezkoak diren kontrol aldaketak aztertzea da. Horretarako sarera konektatutako bihurtgailu baten erantzuna simulatu da tentsio hutsune bifasikoen aurrean, kontrol tradizionalak eta kontrol aurreratuak erabiliz.

Hurrengo sekzioak horrela ordenatuta daude: 2. sekzioan sistema trifasikoaren irudikapen bektoriala eta kontrolaren bektore transformatuak azaltzen dira. Ondoren, 3. sekzioan sare orekatutarako bihurtgailuen kontrol estruktura tradizionala (PI kontrolagailuarekin) azaltzen da. 4. eta 5. sekzioan sare trifasiko desorekatuen kontzeptua eta analisi erremintak azaltzen dira, eta 6. eta sare kodeek ezkatzen duten LVRT babes funtzioa azaltzen da. 7. sekzioan erabili den sare desorekatuetan funtzionatzeko kontrol estruktura egokituaz azaltzen da. 8. sekzioan simulatu diren kasuen emaitzak adierazten dira, eta azkenik 9. sekzioan ateratako ondorioak laburbiltzen dira.

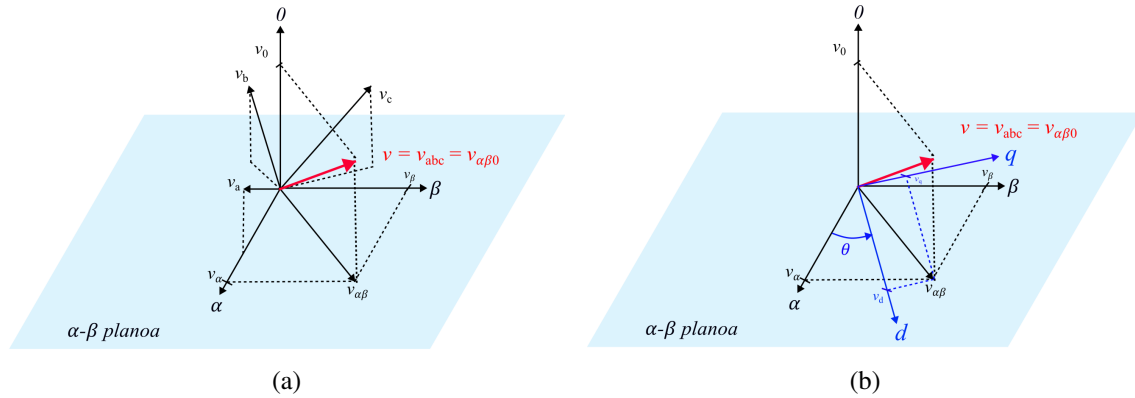
## 2. Bektore transformatuak

Sistema elektriko trifasiko bat elkarri eragiten dauden hiru tentsio eta hiru korronte bezala ulertu daiteke potentzia elektriko transmititzeko. Sistema elektriko trifasikoaren fase bakoitzaren tentsio eta korronteak Kirchhoff-en legeen bitartez erlazionatzen dira. Aldagai hauek bektoreen espazioan adierazten dira faseen tentsio eta korronteak irudikatuz [9].

Analisi motaren arabera, sistema trifasikoen tentsio eta korronte sinusoidalak fasore edo bektore bezala adierazten dira. Fasoreak, maiztasun berdineko seinale sinusoidalekin erabiltzen dira, eta sistemaren erregimen iraunkorreko sistemaren tentsio eta korronteen magnitudeen eta fase angeluen analisia egiteko erabiltzen dira [10].

Erregimen iragankorreko analisia egiteko, ordea, seinale sinusoidalaren maiztasunaren aldaketa eta osagai harmonikoak kontsideratu behar dira. Horretarako, fasoreen ordez bektoreak erabiltzen dira tentsio eta korronteen aldiuneko balioak irudikatuz [11, 12]. Grafikoki, sistema trifasikoa

espazio bektorial trifasikoan irudikatu daiteke 1. irudian adierazten den bezala. Fase ezberdinen tentsio (edo korrante) bektoreen batuketan bektorialak sistemaren tentsio bektorea adierazten du  $V_{abc}$ .



**1. irudia:** Sistema trifasikoaren irudikapen tridimentsionala eta tentsio bektorearen proiektzioa: a)  $\alpha\beta 0$  planoan. b)  $dq0$  ardatzetan.

Bihurgailuen kontrolean ez dira fase guztien tentsio eta korranteak erabiltzen, kontrolatu beharrezko aldagai kopuruagatik. Faseko tentsio eta korrante hauek transformatu batzuen bitartez beste aldagai batzuetara eraldatu egiten dira, kontrolaren konplexutasuna murrizteko.

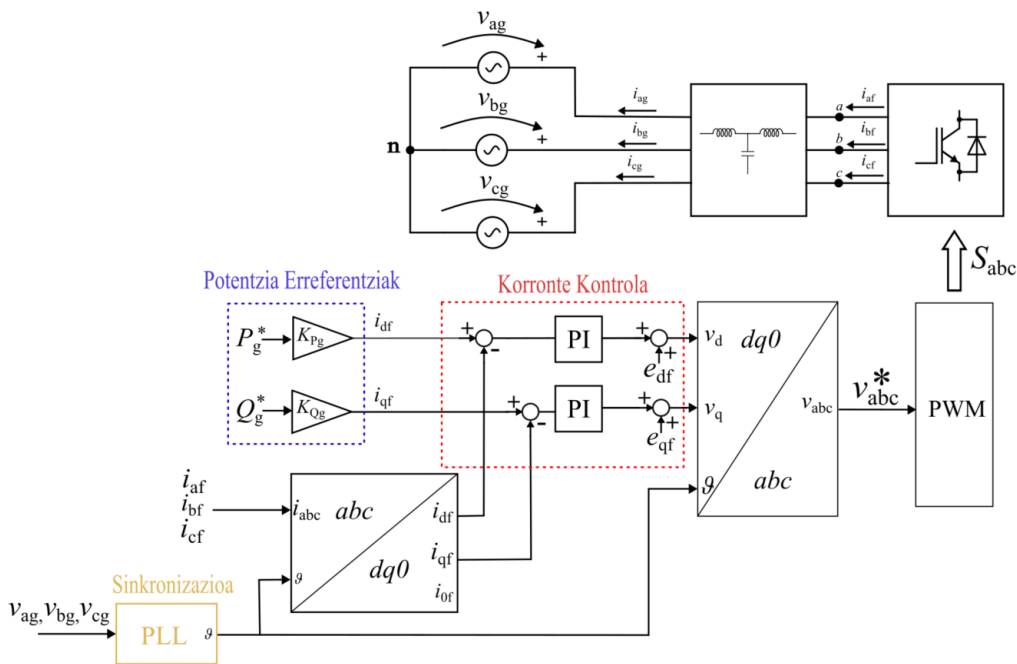
Lehenik eta behin  $\alpha\beta 0$  edo Clarke-n transformatua erabiltzen da, sistemaren tentsio bektorea bi ardatz geldikorretan eta ardatz homopolarrean proiektatzeko. Sistemaren naturagatik ardatz homopolarra mespretxatu daiteke eta, beraz, hiru abc ardatzak bi  $\alpha\beta$  ardatzetan adierazi daitezke. Ondoren  $dq0$  edo Park-en transformatua erabiltzen da,  $\alpha\beta$  planoko erreferentzia sistema biratzeko. Erreferentzia sistema berri honek tentsio bektorearen  $\alpha\beta$  planoko proiektzioaren abiadura berdinarekin biratzen badu, irakurriko diren osagaiek balio konstante bat mantenduko dute. Bi transformatu hauek (1) espresioan adierazten dira eta hauen irudikapena 1. irudian aurkitu daitezke [9].

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, [T_{dq0}] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 3. Bihurgailuen kontrola sare orekatuetan

Sarera konektatutako bihurgailuaren kontrola, bektore espazialen kontrol estrategian oinarritzen da. Kontrol estrategia honetan, sarera konektatutako bihurgailuaren  $dq$  ardatzetako modelo dinamikoa erabiltzen da. Erreferentzia sistema honetan lan egitean, sisteman neurtutako bektore birakariak balio konstante bilakatzen dira, eta kontrolaren ikuspuntutik hau oso interesgarria da PI erreguladore tradizionalarekin lan egiteko [13].

2. irudian, sarera konektatutako bihurgailuen kontrolaren bloke diagrama orokorra laburbiltzen da. Orokorrean, sarera konektatutako bihurgailuak trukatzeko duen potentzia, bihurgailuaren korranteak erregulatuz kontrolatzen dira. Kontrolak bihurgailuaren erregulazioa burutzeko lehenik eta behin sareko tentsioa irakurtzen du, eta daukan korrante erreferentziaren arabera bihurgailuaren irteerako tentsioa aldatzen du, sarearekin trukatzeko korrantea erreferentziaren berdina izan arte. Kalkulu hauek burutzeko, kontrola sarearen tentsio bektorearekin sinkronizatuta egotea nahi-taetzkoa da [14].



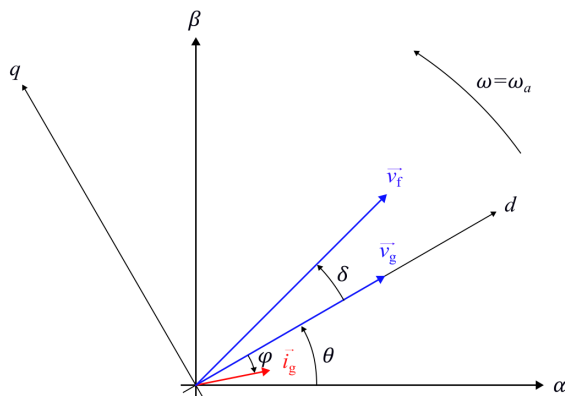
2. irudia: GVOVC Kontrolaren blokeen diagrama.

2. irudian ikusi daitekeen bezala, bi kontrol begizta daude: bat bihurgailuaren korrontearen  $d$  ardatzeko osagaia erregulatzeko eta beste bat, aldiz,  $q$  ardatzeko osagaia. Korrante kontrol begizten erreferentziak sarearekin trukatu nahi den potentzia aktibo eta erreaktibotik kalkulatu dira, ondoren azalduko den bezala.

Orokorrean  $dq$  marko birakorraren  $d$  ardatza ( $\vec{v}_g$ ) sarearen tentsio bektorearekin lerrotatzen da, modelo dinamikoaren espresioak eta hurrengo sekzioetan azalduko diren potentzia terminoak sinplifikatzeko. Grafikoki, bektore hauen lerrotatze egoera 3. irudian adierazten da. Kontrol estrategia honi "sareko tentsioarekiko orientatutako bektore kontrola" deritza edo ingelesez "grid voltage oriented vector control" (GVOVC) [13, 14].

Sarearekin trukaturako potentzia terminoak garatzeko, itxurazko potentziaren espresio orokorretik hasten da  $dq$  konponenteen menpeko espresiora egokituz. 2 espresiotik potentzia aktiboa eta erreaktiboen terminoak lortzen dira.

$$S_g = \frac{3}{2} \cdot (\vec{v}_g) \cdot (\vec{i}_g) = \frac{3}{2} \cdot (v_{d_g} + j \cdot v_{q_g}) \cdot (i_{d_g} + j \cdot i_{q_g}) \quad (2)$$



3. irudia: Marko sinkronoaren  $d$  ardatzaren lerrotatzea sarearen tentsio bektorearekin.

Bestalde, kontsideratuz sareko tentsio bektorearekin lerrotatzerakoan  $V_{qg}$  zero dela, (3) eta (4) espresioak garatzen dira. Espresio hauetatik potentzia aktiboa eta erreaktiboaren espresioak banatuta daudela ondorioztatuta daiteke, eta dq ardatzetan lan eginda,  $i_d$ -rekin  $P_g$  kontrolatu daitezkeela eta  $i_q$ -rekin, ordea,  $Q_g$ .

$$P_g = \frac{3}{2} \cdot \text{Re} \left\{ (\vec{v}_g) \cdot (\vec{i}_g) \right\} = \frac{3}{2} \cdot (v_{d_g} \cdot i_{d_g} + v_{q_g} \cdot i_{q_g}) = \frac{3}{2} \cdot v_{d_g} \cdot i_{d_g} \quad (3)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} \cdot \text{Im} \left\{ (\vec{v}_g) \cdot (\vec{i}_g) \right\} = \frac{3}{2} \cdot (v_{q_g} \cdot i_{d_g} - v_{d_g} \cdot i_{q_g}) = -\frac{3}{2} \cdot v_{d_g} \cdot i_{q_g} \quad (4)$$

Adibide bezala, (5) eta (6) espresioetan  $L$  iragazki baten bitartez konektatutako bihurtutako baten begizta itxiko kontrol sistemaren transferentzia funtzioa aurkitu daitezke, non  $i_{db}^*$  eta  $i_{qb}^*$  korrante begizten  $d$  eta  $q$  ardatzen erreferentziak diren,  $i_{db}$  eta  $i_{qb}$  bihurtutako baten boronietan neuritutako korranteak  $d$  eta  $q$  ardatzetan,  $L_g$  eta  $R_g$  iragazkiaren induktantzia eta erresistentzia,  $K_p$  eta  $K_i$  PI erregulatuaren konstante proportzional eta integrala, eta  $s$  Laplace-n operadorea. Kontuan hartu behar da sarera konektatutako bihurtutako baten eta konexio puntuaren arteko iragazkiaren arabera, kontrol modeloaren parametroak aldatu daitezkeela [15].

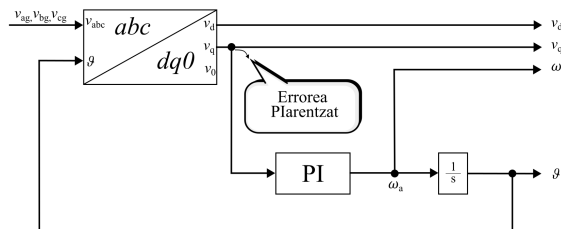
$$\frac{i_{db}(s)}{i_{db}^*(s)} \approx \frac{K_p \cdot s + K_i}{L_g \cdot s^2 + (R_g + K_p) \cdot s + K_i} \quad (5)$$

$$\frac{i_{qb}(s)}{i_{qb}^*(s)} \approx \frac{K_p \cdot s + K_i}{L_g \cdot s^2 + (R_g + K_p) \cdot s + K_i} \quad (6)$$

### 3.1. Sinkronizazio metodoa

Azaldu den bezala, Park-en transformazioa aplikatzeko, sarearen tentsio bektorearen angelua beharrezkoa da. Angelu hau PLL (Phase-Locked Loop) algoritmoen bitartez lortu daiteke, beste era batzuen artean. PLLak sistema trifasiko sinusoidal baten bektorearen angelua lortzen du bektorearen  $dq$  osagaiak erabiliz,  $q$  ardatzeko errorea zerora eramanez. 4. irudian, PLL mota baten bloke diagrama sinpleena adierazten da, erreferentzia sinkronokoa (SRF-PLL, synchronous reference frame PLL), alegia [2].

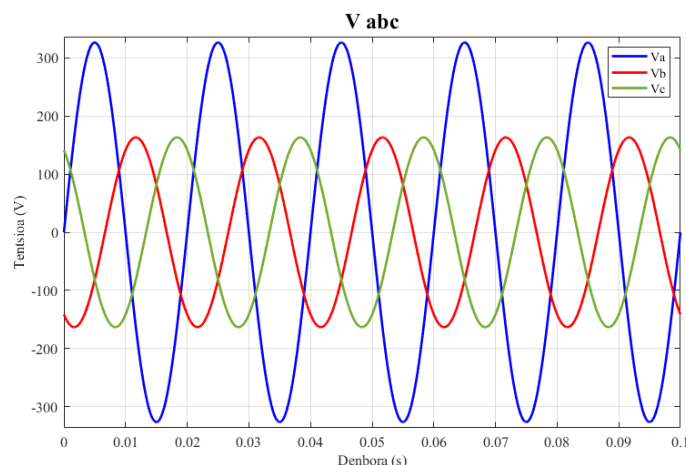
Prozedura hurrengoa da: sarearen tentsio bektoreari zenbatetsitako angelu batekin dq transformazioa aplikatuz  $q$  ardatzean proiektatutako balioa lortzen da. Balio hori zerorekin alderatzen da,  $d$  ardatzarekin lerrotatuta egon beharko delako, eta  $q$  ardatzeko balioa PI erreguladore baten errore moduan sartzen da. Erreguladoreak estimatutako fase angelua eraldatzen du transformazioan lortzen den  $q$  ardatzeko osagaia nulua izan arte, momentu horretan sinkronizazioa lortuz. PLLak etengabe lan egiten du, sarearen tentsio bektorearen biraketa abiaduraren aldakortasunari moldatzeko.



4. irudia: SRF-PLLaren bloke diagrama orokorra.

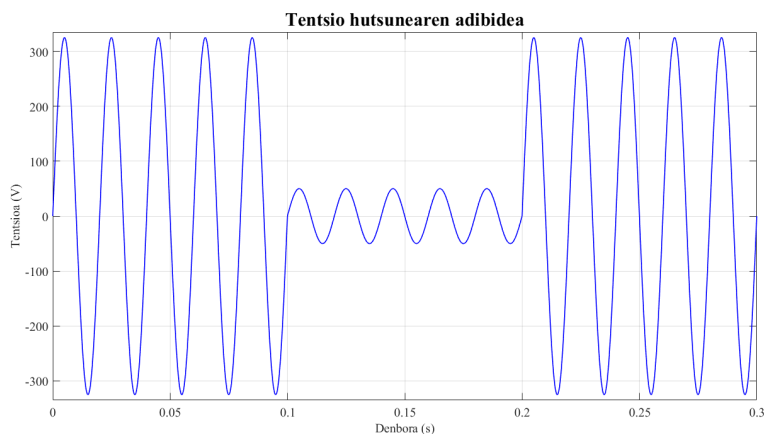
#### 4. Sare trifasiko desorekatuak

Sare elektrikoaren sistema osatzen duten faseak elkarrekiko simetrikoak ez direnean, hau da, faseko tentsio eta/edo korronteen anplitude desberdinak edo desfase ez orekatuak dauzkatenean, sarea desorekatua dagoela esaten da. Desoreka hauek arrazoi ezberdinak eduki ditzakete: sareko faltak edo kontsumo monofasikoak nagusienak izanda [16]. Falta motaren arabera, esaterako, monofasikoa edo bifasikoa, eta sarearen lurrerako konexioaren arabera, hiru faseen tentsio eta korrontek era desberdinetan eraldatzen dira [17]. 5. irudian, sistema trifasiko baten adibide bat erakusten da ( $a, b, c$  faseak), non  $a$  fasearen anplitudea beste bi faseena baino handiagoa den.



5. irudia: Sistema trifasiko baten tentsio seinaleak.

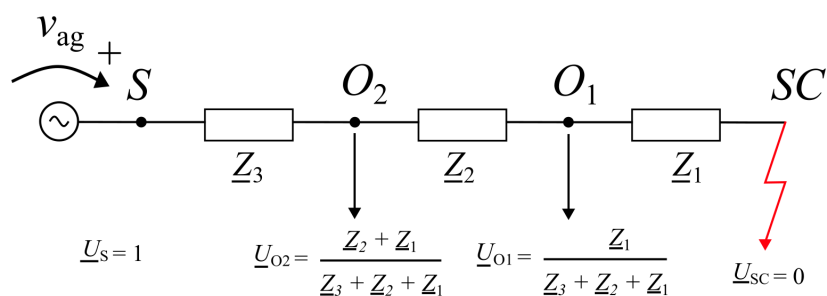
Bat-batean gertatutako fase edo faseen tentsio jaitsiera denbora batean mantentzen denean eta ondoren tentsioaren balio nominalera bueltatzen den gertaerari tentsio hutsunea deritzo. 6. irudian hutsune baten adibidea ikus daiteke, non tentsioaren anplitudea bat-batean 325 V-tik 50 V-ra murrizten den, eta 0,1 segundu ondoren berriro balio nominalera igotzen den.



6. irudia: Iraupen laburreko tentsio hutsunea

Puntu batean ikusiko den tentsio hutsunearen magnitudea edo sakonera, falta gertatu den puntuaren, puntu horren eta elikadura iturrien arteko distantziaren arabera da. Izan ere, distantzia horrek puntu ezberdinen arteko inpedantziatan eragina du. Elikadura iturritik falta gertatu den puntura dauden puntu ezberdinetan ikusten den inpedantzia erlatiboak, faltaren ondoren gertatu den hondar-tentsioa baldintzatuko du. Adibide moduan, 7. irudian linea baten puntu ezberdinetako tentsio banaketa adierazten da, elikadura iturrian hondar-tentsioa 1 pu (unitateko, ingelesez per

unit) eta falta puntuan 0 pu izanik [16].

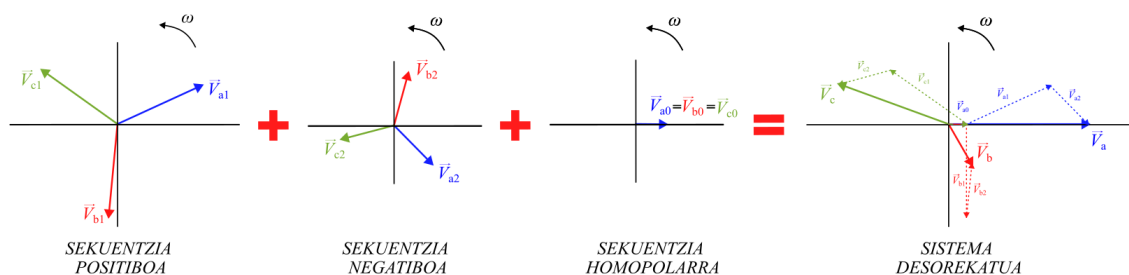


7. irudia: Hondar tentsioak linea baten puntu ezberdinetan.

Desoreka egoeran, sarera injektatutako korronteek ohiko itxura sinusoidal eta/edo orekatua galtzen dute, eta, ondorioz, sortutako korrante eta tentsio desorekatuen arteko interakzioek oszilazio kontrolaezinak sortzen dituzte bihurgailuan, honen kontrolean eta sarearekin trukaturako potentzia aktibo eta erreaktiboa. Baldintza hauetan lan egin ahal izateko kontrol egitura eraldatzea komeni da, hurrengo ataletan azalduko den bezala [16].

## 5. Osagai simetrikoak

Sistema trifasiko desorekatuak analizatzeko 1918an Fortescue-k osagai simetrikoen metodoa proposatu zuen. Metodo honen arabera, edozein sistema polifasiko desorekatu, sistema horren sekuentzia ezberdinez osatutako sistema orekatuen batura bezala deskonposatu daiteke. Sistema trifasiko baten kasuan, sistema desorekatu bat sekuentzia positibo, negatibo eta homopolarretan deskonposatu daiteke, fase bakoitzeko tentsioa fase horri dagozkion hiru osagaien batura izanik, 8. irudian adierazten den bezala.



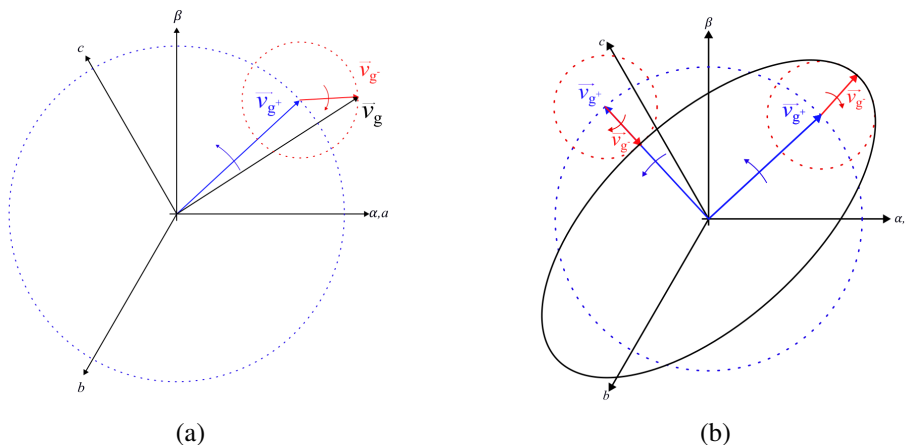
8. irudia: Sistema trifasiko desorekatu baten osagai simetrikoak.

## 6. Bihurgailuen kontrola sare desorekatuetan

Azaldu den bezala, edozein sistema desorekatu sekuentzia simetrikoen teorema aplikatuz, sekuentzia orekatu ezberdinetan banatu daiteke, eta horrek analisia sinplifikatzen du. Sistema trifasiko desorekatu baten kasuan, sekuentzia zuzen, alderantzizko eta homopolarretan deskonposatzen da analisia egiteko.

Osagai homopolarra mesprextatuz zirkuitua ixteko biderik ez dagoelako [18], sistema trifasikoaren tentsio bektorea sekuentzia zuzen eta alderantzizkoan deskonposatu daiteke. Bi bektoreek abiadura angeluar berdina daukate eta hauen mugimenduen norabidea kontrako da.

Orokorrean anplitude eta desfase angelu desberdinak daukate euren artean, hortaz bi bektoreen batuketa bektorialak periodo oso batean ibilbide eliptiko bat deskribatuko du. Bi sekuentziak

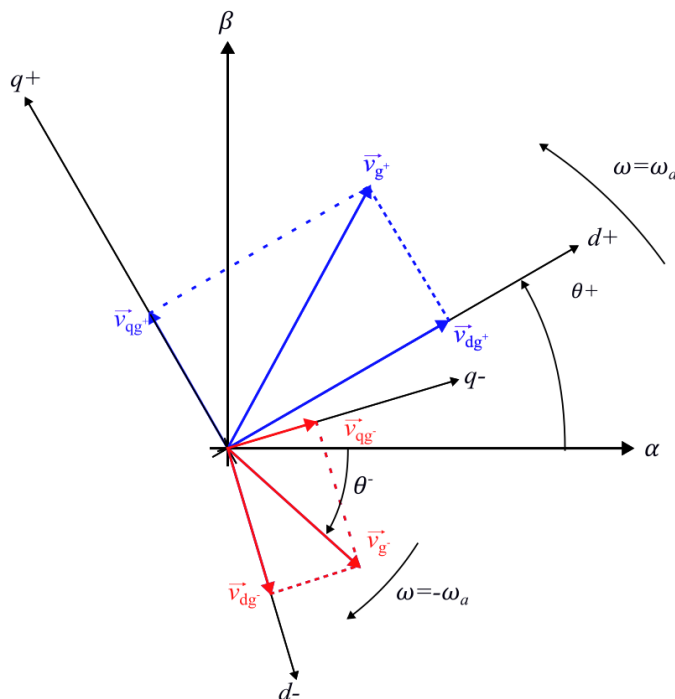


**9. irudia:** Sare desorekatuen sekuentzien tentsio bektoreak  $\alpha\beta 0$  planoan: a) Sareko tentsio bektore erresultantea; b) Ibilbide eliptikoa.

lerrokatzen diren puntuan, tentsio bektore erresultanteak  $\vec{V}_g$ , balio maximo eta minimoa hartuko du. Elipsearen deformazioa sekuentzia negatiboko osagaiaren magnitudearen araberakoa izango da.

9. irudian, sekuentzia positibo eta negatiboen batuketa bektorialak tentsio bektore erresultantearen magnitudea eta ibilbide eliptikoa adierazten dira, sekuentzia positiboaren periodo batean [7, 13].

Kontrola sare desorekatuen aurrean lan egiteko gai izateko, sekuentzia bakoitza korrante kontrol begizta bakoitzarekin kontrolatzen da. Horretarako, bi  $dq0$  kontroladore sekuentzia positiboaren korranterako eta beste bi kontroladore sekuentzia negatiborako erabiltzen dira. Estrategia honi *bektore kontrol duala* deritzo.



**10. irudia:** Erreferentzia marko sinkrono bikoitza tentsio desorekatuen aurrean.

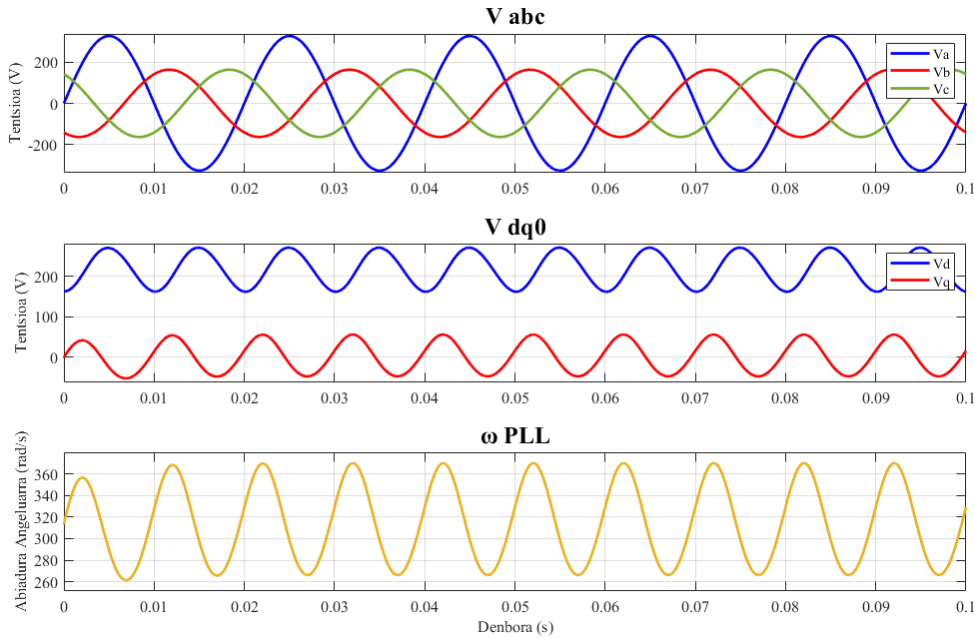
Sare orekatuen kasuan egin den bezala, sekuentzia bakoitzarekin sinkronizatuta biratzen duten bi erreferentzia sistema sortu daitezke:  $dq^+$  eta  $dq^-$ . Horrela, sekuentzia bakoitzaren erreferentzia



sistema sinkronoarekiko proiektzioak konstante bezala irakurriko dira. Grafikoki, egoera hau 10. irudian adierazten da.

Kasu honetan, ordea, erreferentzia sistema sinkrono bakoitzean beste sekuentziaren bektore espazialaren proiektzioak ere irakurtzen dira. Aurkako sekuentziak abiadura berdinean baino kontrako norantzan biratzen dutenez, irakurritako seinalea sekuentzia bakoitzaren proiektzio konstante bat izango da, aurkako sekuentziaren proiektzio aldakorarekin batera. Proiektzio aldakor hau aurretik azaldu den SRF-PLLarentzat arazo bat da, PI erreguladoreak ezin baidu seinale sinusoidalekin lan egin. 11. irudian SRF-PLLaren angeluaren neurketa sare desorekatuaren aurrean adierazten da.

Arazo hau konpontzeko, oszilazio hauek iragazi behar dira, metodo ezberdinak erabiliz. iragazkiak erabiltzen badira, hala nola, pasa-baxuko iragazkiak edo notch iragazkiak. 100 Hz-ko oszilazio hauek iragazkien bitartez iragazteko, ordena handiko iragazkiak erabili behar dira, sinkronizazio metodoaren dinamika murriztuz. Beste aukera bat seinale atzeratuaren bidezko deuseztapenaren edo DSC (Delayed Signal Cancellation) metodoarekin oszilazioak deuseztatzea da [7, 13, 14], baina metodo honek 5 ms-ko atzerapena sartzen du sekuentziak deskonposatzeko [19], hortaz DSOGI-PLL metodoa erabili da lan honetan.



**11. irudia:** PLLaren angeluaren neurketa ikusi daiteke sare desorekatuaren aurrean.

DSOGI-PLL metodoak bigarren mailako integratzaile orokortu bikoitzeko PLLa erabiltzen du sinkronizazio metodo bezala (ingelesez Dual Second Order Generalized Integrator, DSOGI). Horrela, sekuentzia positiboa eta negatiboa banatzea lortzen da, sekuentzia positiboaren tentsio bektorearekin sinkronizatzeko eta sekuentzia bakoitzaren korrontea modu bereizian kontrolatzeko.

Sekuentzien banaketa hau koadraturan ( $90^\circ$  atzeratuta) dauden seinaleen sorkuntzarekin burutu daiteke, 7 espresioak jarraituz, non  $q = e^{-j\pi/2}$  den [7, 13].

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha_g}^+ \\ v_{\beta_g}^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha_g} \\ v_{\beta_g} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_{\alpha_g}^- \\ v_{\beta_g}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha_g} \\ v_{\beta_g} \end{bmatrix} \quad (7)$$

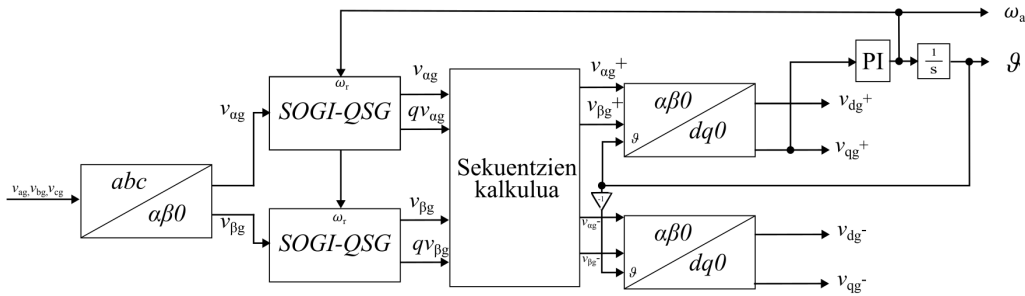
Lehenengo urratsa tentsio bektoreari Clarke-ren transformatua aplikatzea da honen  $\alpha\beta 0$  osagaiak lortzeko. Ondoren bi seinale hauek iragazten dira eta koadraturan dauden beste bi seinale sortzen dira. Horretarako bi transferentzia funtzio erabiltzen dira,  $x'$  eta  $qx'$ , seinalea iragazteko eta honen koadraturan dagoen seinalea sortzeko, hurrenez hurren. Hauen transferentzia funtzioak (8)

eta (9) espresioetan adierazten dira. Koadratura seinale sortzaile honi SOGI-QSG deritza (SOGI - Quadrature Signal Generator).

$$\frac{x'}{x}(s) = \frac{K\omega_r s}{s^2 + K\omega_r s + \omega_r^2} \quad (8)$$

$$\frac{qx'}{x}(s) = \frac{K\omega_r^2}{s^2 + K\omega_r s + \omega_r^2} \quad (9)$$

Sekuentzia positiboaren fase-angelua eta abiadura angeluarra kalkulatzeko aurretik erabilitako SRF-PLL algoritmoa erabiliko da. SOGI-QSG eta SRF-PLL algoritmoak batera erabiltzean DSOGI-PLL deritza. 12. irudian DSOGI-PLL algoritmoaren bloke diagrama adierazten da. Ikusi daitekeen bezala, SRF-PLL blokeak kalkulaturako abiadura angeluarra SOGI-QSG blokeari sartzen zaio sarrera bezala, eta fase angelua transformazio errotazional guztiei [7, 13].



12. irudia: DSOGI-PLLaren bloke diagrama.

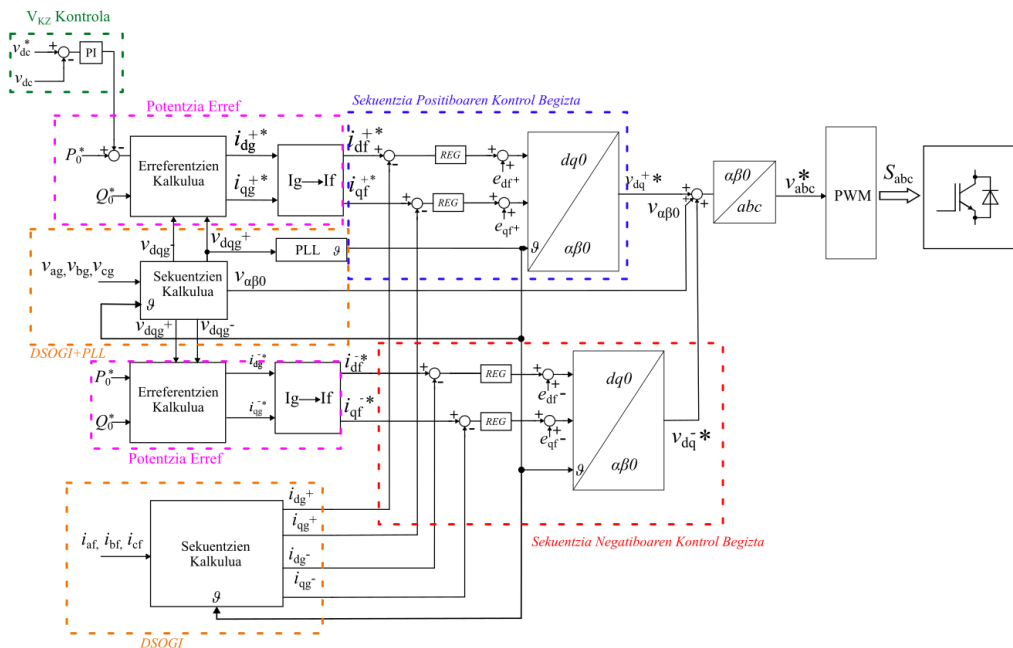
Sekuentzien gurutzaketaren ondorioz, batezbesteko potentzia aktibo eta erreaktiboak ( $P_0$  eta  $Q_0$ ) eta potentzia aktibo eta erreaktiboaren termino oszilakorrak agertzen dira ( $PC_2$ ,  $PS_2$  eta  $QC_2$ ,  $QS_2$ ). Trukatutako potentzia aktibo eta erreaktiboaren termino guztiak (10) espresioan laburbiltzen dira.

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ PC_2 \\ PS_2 \\ Q_0 \\ QC_2 \\ QS_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{dg}^+ & v_{qg}^+ & v_{dg}^- & v_{qg}^- \\ v_{dg}^- & v_{qg}^- & v_{dg}^+ & v_{qg}^+ \\ v_{qg}^- & -v_{dg}^- & -v_{qg}^+ & v_{dg}^+ \\ v_{qg}^+ & -v_{dg}^+ & v_{qg}^- & -v_{dg}^- \\ v_{qg}^- & -v_{dg}^- & v_{qg}^+ & -v_{dg}^+ \\ -v_{dg}^- & v_{qg}^- & v_{dg}^+ & v_{qg}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dg}^+ \\ i_{qg}^+ \\ i_{dg}^- \\ i_{qg}^- \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sekuentzia bakoitzaren korrante kontrolerako erreferentziak, kasu honetan, sarearekin trukatu nahi den batezbesteko potentzia aktiboa  $P_0^*$  eta erreaktiboa  $Q_0^*$  izango dira. Espresioan lau korrante aldagai daude, sei potentzia aldagai kontrolatzeko, ondorioz, ezin dira potentzia termino guztiak kontrolatu.

Korrante erreferentziak sortzeko alderantzikatu behar da. Matrize karratua egiteko bi errenkada alde batera uzten dira, hauen potentzia terminoak baztertuz. Kendutako errenkaden arabera (2. eta 3. edo 5. eta 6.) posible da potentzia aktiboaren edo potentzia erreaktiboaren termino oszilakorrak zerora finkatzea. Orokorrean potentzia aktiboaren termino hauek zerora eramatea erabakitzen da, KZ tentsio oszilazioak minimizatzen [13, 18].

Behin sinkronizazio metodoaren eta sekuentzien banaketaren metodoen eraldapenak aztertuta, bihurtutako kontrolak sare desorekatuen aurrean lan egin dezake. Laburbiltzeko asmoarekin, sare



13. irudia: Bektore kontrol dualaren bloke diagrama sare desorekatueterako.

desorekatueterako kontrol diagrama 13. irudian adierazten da. Bertan sekuentzia positiboaren eta negatiboaren korrante kontrol begiztak ikus daitezke  $dq$  ardatzetan, eta hauen erreferentziak batezbesteko potentzia erreferentzietatik kalkulatu dira. Sinkronizatzeko, azaldu den bezala, sareko tentsioak neurtzen dira eta sekuentzia positiboa PLLra sartzen da fasea eta maiztasuna kalkulatzeko. Azkenik, bihurgailuak kontrolak sortutako tentsio erreferentzia seinalea sintetizatzen du modulazioaren bitartez.

## 7. Tentsio baxuetan konektatuta jarraitzeko ahalmena (LVRT)

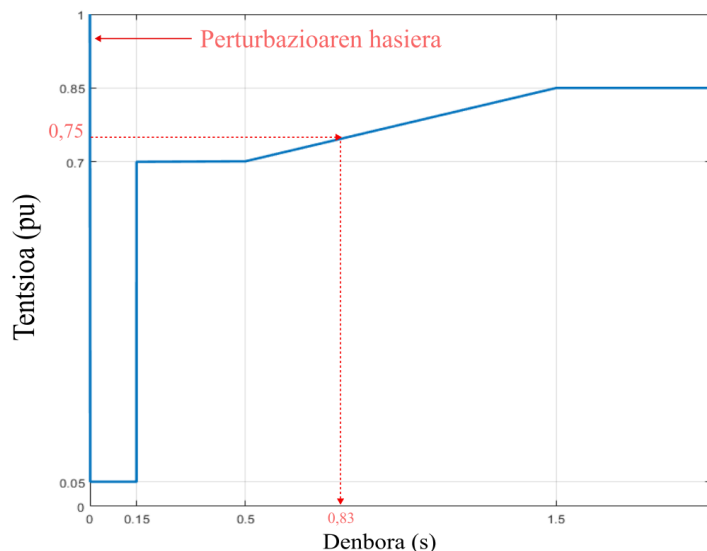
Tentsio baxuko sarera konektatutako jarraipen ahalmena edo ingelesez Low Voltage-Ride Through (LVRT), sarera konektatutako bihurgailuak tentsio jaitsieren aurrean denbora motz batean sarera konektatuta jarraitzeko kontrol funtzio bat da. Funtzionamendu normalean bihurgailuak potentzia aktiboa kontsumitu edo injektatzen du sarera karga edo energia sortze aplikazio bat denaren arabera. Potentzia erreaktiboarekin ere lan egin dezake, potentzia faktore hobetze aplikazioetan. Tentsio hutsune baten aurrean, funtzionalitate hauek utzi eta bihurgailuaren konexio puntuaren eta herrialdearen arabera sareari babesa emateko araudietan espezifikatzen den portaera izango du [4].

LVRT kurba karakteristikoak orokorrean tentsio-denbora profil batzuk dira. Kurba hauek sargailuak konektatuta mantendu behar diren denbora minimoa zehazten dute, tentsio hutsunearen sakoneraren arabera. Sare kode batzuek potentzia aktiboaren eta erreaktiboaren injekzioa eskatzen dute tentsioa balio nominalera bueltatzen direnean [2].

Lan honetan LVRT funtzioak implementatzeko gida bezala [3] araudia hartu da, eta bertan 110 kV baino tentsio txikiagoko konexio puntuen arauak aplikatzen dira. Araudiak espezifikatzen duen bezala, 14. irudian erakutsitako LVRT tentsio profila ziurtatu behar da.

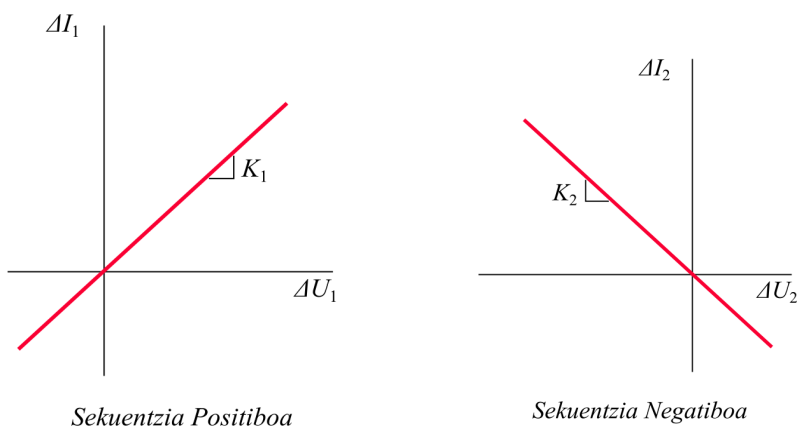
Bestalde, sistemaren tentsioaren egonkortasuna mantentzeko, bihurgailuei potentzia erreaktiboa injektatzea eskatzen zaie. [20] erreferentzian azaltzen den bezala, falta motaren arabera sekuentzia positiboko eta negatiboko potentzia erreaktiboa injektatu behar da tentsioaren anplitudea operazio limiteetan mantentzeko.

Falta motaren arabera (orekatua edo desorekatua) potentzia erreaktiboa injektatzeko 15. irudian adierazten diren korrante profilak erabiltzen dira. Profilek korrante erreaktiboaren magnitu-



**14. irudia:** UE 2016/631 araudian 110 kV baino txikiagoko konexio puntuetako LVRT tentsio profila.

dea definitzen dute tentsio hutsunearen sakoneraren arabera [18]. Ondorioz, korrante erreaktiboa injektatuz potentzia erreaktiboa injektatzen da sarean.

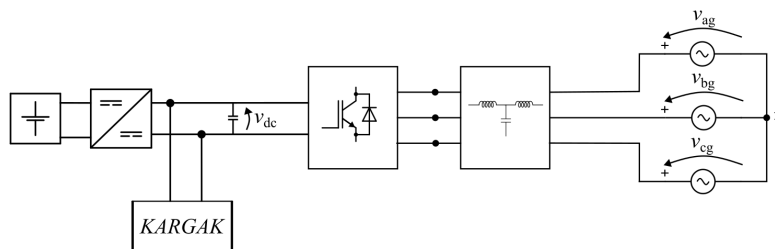


**15. irudia:** Korrante erreaktibo azkarraren injekzio profilak.

## 8. Kasu azterketa

Behin kontrol mota bakoitzaren funtzionamendua ulertuta, atal honetan egoera ezberdinen aurrean simulatutako emaitzak aztertuko dira. Simulazio hauetan kontsideratuko den sarera konektatutako bihurgailuaren aplikazioa KZ mikro-sare edo karga baten elikatzea edo energia sortzaile baten sarearen integrazioa izango da. Baldintza normaletan lan egiten duenean bihurgailuak potentzia aktiboa xurgatzen duela suposatuko da, eta sarean falta bat agertzen denean, bihurgailuak potentzia aktiboaren kontsigna aldatzen du eta sareari babesa ematen dio potentzia erreaktiboa injektatuz. 16. irudian bihurgailuaren aplikazioaren eskema ikusgai dago, eta 1. taulan simulazio modelorako erabili diren parametroen balioak laburbiltzen dira.

Simulazioetan tentsio hutsuneez UNE EN 2016/631 araudiak agindutako profila jarraitzen

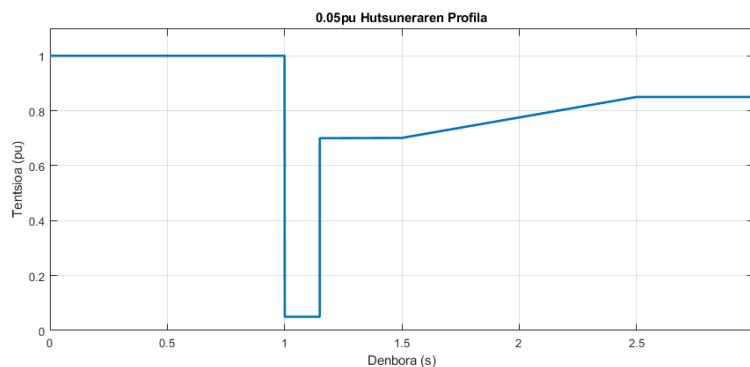


**16. irudia:** Simulazioetarako kontsideratu den aplikazioaren diagrama.

**1. taula:** Kontsideratutako sarera konektatutako 2L-VSC bihurtgailuaren modeloaren parametrorik esanguratsuenak

Deskribapena	Parametroa	Balioa
Sarearen fase-fase tentsioa	$U_N$	400 V
Bihurtgailuaren potentzia nominala	$S_N$	100 kVA
Kommutazio maiztasuna	$f_{SW}$	20 kHz
Kommutazio denbora hilak	$t_d$	500 ns
KZ busaren tentsioa	$V_{DC}$	725 V
KZ busaren kapazitatea	$C_{DC}$	280 $\mu$ F
Sarera aldeko iragazkiaren inдукtantzia (Faseko)	$L_g$	50 $\mu$ H
Bihurtgailura aldeko iragazkiaren inдукtantzia (Faseko)	$L_f$	100 $\mu$ H
Iragazkiaren kapazitatea (Faseko)	$C_f$	80 $\mu$ F
Iragazkiaren kondentsadorearen erresistentzia (Faseko)	$R$	1 m $\Omega$
Kontrolaren laginketa periodoa	$T_s$	50 $\mu$ s

dutela suposatu da. Hutsune bifasikoak simulatzeko, 17. irudian adierazitako 0.05 pu-ko hondar tentsioa duen hutsune profila  $b - c$  faseei aplikatuko zaie.

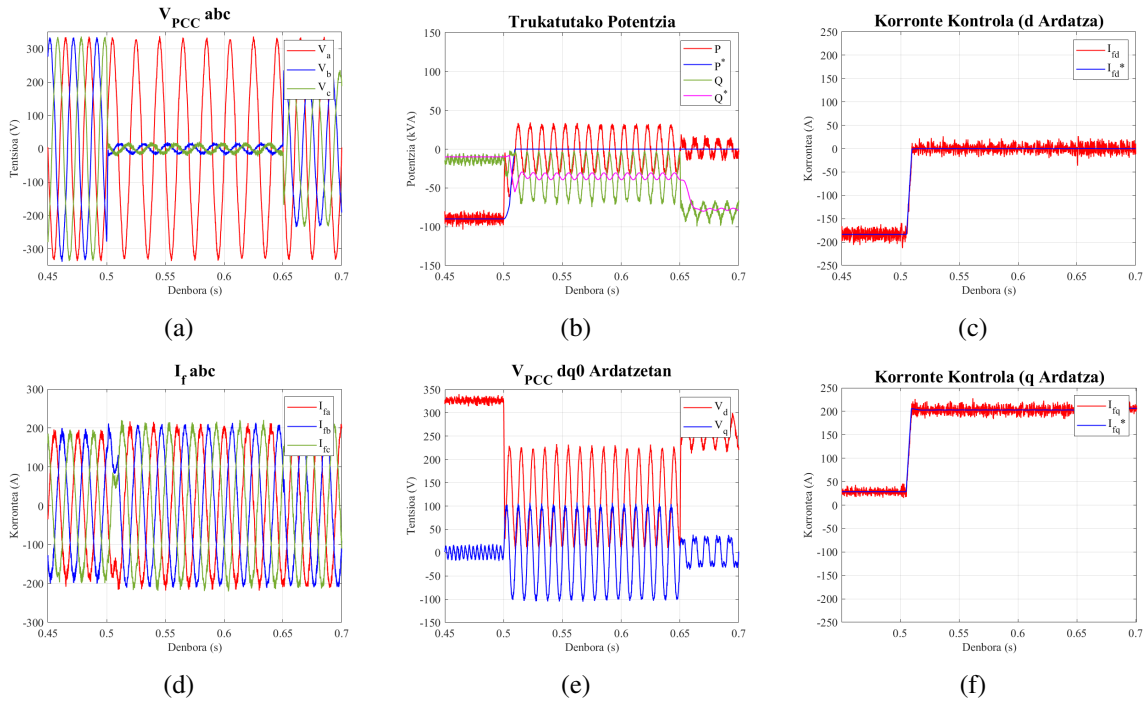


**17. irudia:** Simulaziorako hutsuneen profila.

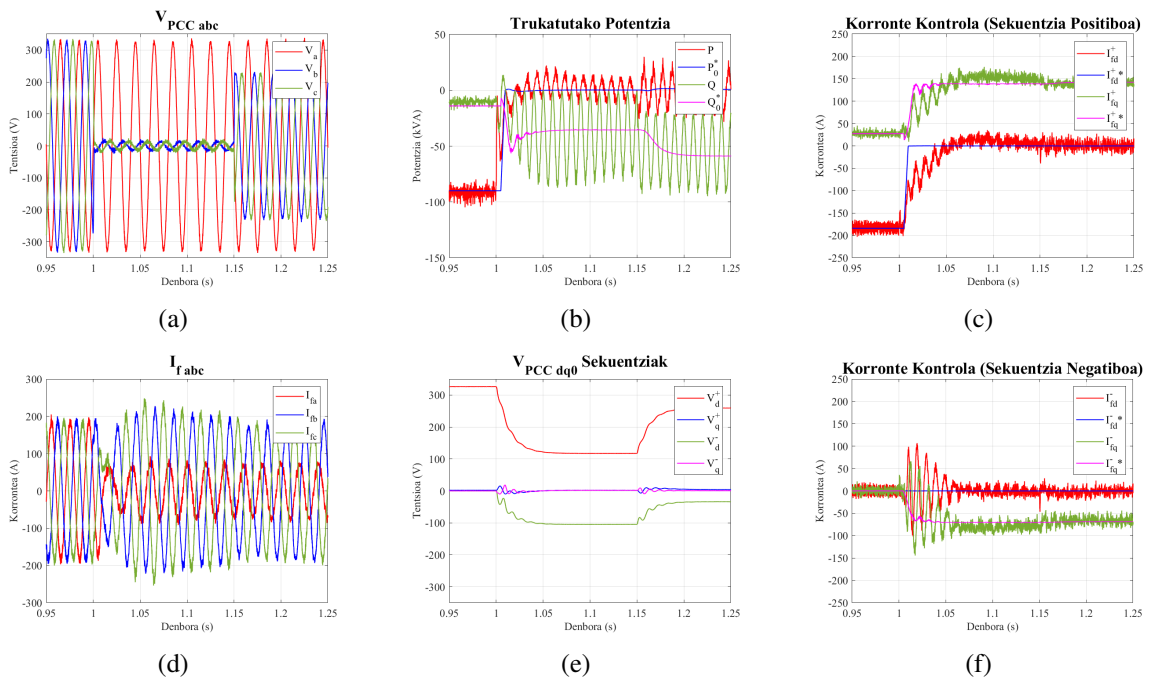
Lehenik eta behin, sare orekatuen kontrolaren erantzuna hutsune bifasikoaren aurrean aztertuko da. Simulazioaren emaitzak 18. irudian erakusten dira.

Irudiko grafikoak aztertuz, ikus daiteke kontrola gai dela hutsunearen aurrean konektatua jarraitzeko eta sekuentzia positiboko korrante errektiboa injektatzeko, nahiz eta sarean sekuentzia negatiboa agertzen den. Kontrol honek bakarrik sekuentzia positiboko korrantea kontrolatzeko gaitasuna daukanez, araudiak eskatzen duen sekuentzia negatiboa ezin du injektatu. Gainera, sareko sekuentzia negatiboaren ondorioz potentzia aktiboaren oszilazioak agertzen dira, 18b. grafikoan ikus daitekeen bezala, eta kontrola ez da gai oszilazioak murrizteko.

Ondoren, sare desorekatuen kontrolarekin burututako hutsune bifasikoaren simulazioaren emai-



**18. irudia:** Bihurgailuaren erantzuna hutsune bifasikoaren simulazio egoeren aurrean. a) Sareko tentsio trifasikoak. b) Sarearekin trukaturako potentzia. c)  $d$  ardatzeko korrante kontrol seinaleak. d) Sareko korrante trifasikoak. e) Sareko tentsioa  $dq$  ardatzetan. f)  $q$  ardatzeko korrante kontrol seinaleak.



**19. irudia:** Bihurgailuaren erantzuna hutsune bifasikoaren simulazio egoeren aurrean. a) Sareko tentsio trifasikoak. b) Sarearekin trukaturako potentzia. c) Sekuentzia positiboaren korrante kontrol seinaleak  $dq$  ardatzetan. d) Sareko korrante trifasikoak. e) Sareko tentsioa  $dq$  ardatzetan. f) Sekuentzia negatiboaren korrante kontrol seinaleak  $dq$  ardatzetan.

tzak aztertuko dira, 19. irudian ikus daitezkeenak. Kasu honetan, azaldu den bezala, kontrolak perturbazioa detektatzen duenean potentzia errektiboa injektatuko du sekuentzia positibo eta negatiboan.

19c. eta 19f. grafikoetan ikus daitezkeen bezala, sistema gai da korrante errektibo azkarra sekuentzia positibo eta negatiboetan injektatzeko, araudiak ezarritako erantzun denbora baino lehen. Injekzio horren ondorioz, korrante trifasiko desorekatuak agertzen dira, eta horrek adierazten du kontrolak sare desorekatuaren egoerari erantzuten diela.

Hala ere, trantsizio prozesuan, korrante kontrolleko seinaleetan oszilazioak nabari daitezke. Fenomeno hau sekuentzien erauzketa blokearen dinamikaren ondorio zuzena da, erauzketa prozesuak denbora jakin bat behar duelako sekuentziak modu egokian banatzeko.

Bi kontrol motek eskaintzen dituzten funtzionalitateak konparatzeko asmoz, 2. taulan simulazioetatik ondorioztatu diren kontrol bakoitzaren ezaugarriak laburbiltzen dira. Esan bezala, bi kontrolekin bihurgailua konektatuta mantentzeko gai da, eta baita sekuentzia positiboko korrante errektiboa injektatzen ere bai. Desberdintasun nagusia sekuentzia negatiboaren korrante kontrolagarritasunean dago, sare desorekatuen kontrolak funtzionalitate honekin sekuentzia negatiboko korrante errektiboa injektatu dezake eta baita potentzia aktiboaren oszilazioak kontrolatu. Sare orekatuen kontrolak ordea, sekuentzia negatiboaren kontrola burutzen ez duenez, funtzionalitate hauek ezin ditu eskaini.

2. taula: Kontrol ezberdinen funtzioen alderaketa.

Kontrol Mota	Konektatuta mantendu	Korrante errektiboaren injekzioa		P oszilazioak
		Sek. Positiboa	Sek. Negatiboa	
Sare Orekatua	✓	✓	×	Kontrolaezinak
Sare Desorekatua	✓	✓	✓	Kontrolagarriak

Bi kontrolen emaitzak aztertuta, argi geratzen da sare desorekatuetarako kontrola funtsezkoa dela araudiak ezarritako eskakizunak betetzeko. Lehenik eta behin, sekuentzia negatibo eta positiboetan korrante errektiboa injektatzeko gaitasuna bermatzeko, eta bestetik, potentzia aktiboaren oszilazioak murrizten laguntzeko.

## 9. Ondorioak

Lan honetan bihurgailuen kontrol klasikoaren hutsuneen aurreko mugak aztertu dira, eta muga horiei aurre egiteko sare desorekatuen kontrol metodoak aztertu eta inplementatu dira. Sarera konektatutako bihurgailuaren modeloaren tentsio perturbazioen aurreko simulazioen erantzunak ikusi ondoren, kontrol orekatuaren eta kontrol desorekatuaren portaerari buruz ondorio ezberdinak atera daitezke.

Hutsune bifasikoaren aurrean, kontrol klasikoak erabiliz bihurgailua sarera konektatuta mantentzeko gai izan da, nahiz eta sarea desorekatua izan. Kasu horretan ikusi da sare desorekatuetan agertzen den sekuentzia negatiboko tentsioak sortzen dituen potentzia aktiboaren oszilazioak sortzen direla, hauek KZ buserako kaltegarriak izanik.

Horrez gain, kontrol orekatuak sekuentzia positiboaren korranteak injektatzeko kapazitatea dauka bakarrik, eta araudiak adierazten duen sekuentzia negatiboko korrante errektiboaren injekzioa ezin du burutu.

Muga hauek gainditzeko sare desorekatuen kontrolaren garapena eta modeloaren simulazioak egin dira. Lortutako emaitzetan ikusi da erregimen iraunkorrean kontrol mota hau potentzia aktiboaren oszilazioak murrizteko gai dela, eta hutsuneen aurrean sekuentzia negatiboko korrante errektiboa injektatzeko gai dela araudiaren erantzun denbora maximoen barnean. Hala ere, sekuentzien kalkuluaren blokearengatik kontrol mota honen erantzun dinamikoan oszilazio batzuk sortzen direla ikusi da.

## Erreferentziak

- [1] T. B. NADEEM, M. SIDDIQUI, M. KHALID eta M. ASIF, 2023, «Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies», *Energy Strategy Reviews*, **48**, 101096.
- [2] R. ALJARRAH, B. B. FAWAZ, Q. SALEM, M. KARIMI, H. MARZOOGHI eta R. AZIZIPANAH-ABARGHOEE, 2024, «Issues and challenges of grid-following converters interfacing renewable energy sources in low inertia systems: A review», *IEEE Access*, **12**, 5534–5561.
- [3] E. COMMISSION, 2016, «Commission regulation (eu) 2016/631 of 14 april 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators», Official Journal of the European Union.
- [4] Z. HASSAN, A. AMIR, J. SELVARAJ eta N. A. RAHIM, 2020, «A review on current injection techniques for low-voltage ride-through and grid fault conditions in grid-connected photovoltaic system», *Solar Energy*, **207**, 851–873.
- [5] J. JIA, G. YANG eta A. H. NIELSEN, 2018, «A review on grid-connected converter control for short-circuit power provision under grid unbalanced faults», *IEEE Transactions on Power Delivery*, **33**(2), 649–661.
- [6] A. GOMEZ-RAYA, A. LOPEZ-DE HEREDIA, E. BILBAO eta A. SANCHEZ-RUIZ, 2025, «Sarera Konektatutako Bihurgailuen Hutsuneen Aurreko Erantzuna», *IkerGazte Nazioarteko ikerketa euskaraz*, **3**, 43–50.
- [7] R. TEODORESCU, M. LISERRE eta P. RODRIGUEZ, 2010, *Control of Grid Converters under Grid Faults*, 237–287, John Wiley & Sons.
- [8] R. KABIRI, D. G. HOLMES eta B. P. MCGRATH, 2016, «Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages», *IEEE Transactions on Industry Applications*, **52**(2), 1660–1668.
- [9] R. TEODORESCU, M. LISERRE eta P. RODRIGUEZ, 2010, *Appendix A: Space Vector Transformations of Three-Phase Systems*, 355–362, John Wiley & Sons.
- [10] C. K. ALEXANDER eta M.N. O. SADIKU, 2013, *Senoides y fasores*, 319–357, McGraw-Hill Education.
- [11] A. YAZDANI eta R. IRAVANI, 2010, *Space Phasors and Two-Dimensional Frames*, 69–114, IEEE.
- [12] R. M. MILASI, A. F. LYNCH eta Y. W. LI, 2013, «Adaptive vector control for voltage source converters», *IET Control Theory & Applications*, **7**(8), 1110–1119.
- [13] G. ABAD, 2016, *Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications*, Wiley, Chichester, U.K.
- [14] R. TEODORESCU, M. LISERRE eta P. RODRIGUEZ, 2010, *Grid Current Control*, 313–354, John Wiley & Sons.
- [15] A. BILBAO, G. ABAD, A. SANCHEZ-RUIZ, E. UNAMUNO, M. ZUBIAGA, J. ARZA eta P. IZURZA-MORENO, 2022, «Current references limitation method considering voltage and current maximums for statcoms providing simultaneously reactive power and current harmonics», *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **10**(2), 2559–2575.



- [16] M. H. BOLLEN, 2000, *Voltage Sags Characterization*, 139–251, IEEE.
- [17] D. SWEETING, 2012, «Applying iec 60909, fault current calculations», *IEEE Transactions on Industry Applications*, **48**(2), 575–580.
- [18] J. JOSHI, A. K. SWAMI, V. JATELY eta B. AZZOPARDI, 2021, «A comprehensive review of control strategies to overcome challenges during lvrt in pv systems», *IEEE Access*, **9**, 121804–121834.
- [19] M. BOLLEN, J. SVENSSON eta A. SANNINO, 2007, «Practical implementation of delayed signal cancellation method for phase-sequence separation», *IEEE Transactions on Power Delivery*, **22**(1), 18–26.
- [20] A. CAMACHO, M. CASTILLA, J. MIRET, R. GUZMAN eta A. BORRELL, 2014, «Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults», *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**(11), 6224–6234.